

Подавление обратного перерегулирования в системах автоматике

В.А. Жмудь

ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация. Задача управления объектами, склонными к колебаниям, крайне сложна. Аналитические методы в случае сложной модели объекта уступают по возможностям методам, основанным на численной оптимизации регуляторов. Инструментарий этого метода составляет набор структур регуляторов, набор целевых функций и средства для моделирования и оптимизации. Ряд работ автора посвящен методам построения целевых функций, их достоинствам и недостаткам, а также обоснованию выбора программы *VisSim* для моделирования и оптимизации [1–6]. Наиболее часто используемые структуры регулятора – это последовательный ПИД-регулятор, который содержит пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий тракты. В ряде случаев специальные меры при выборе целевой (стоимостной) функции позволяют подавить колебания в системе, однако, в некоторых случаях даже эти меры недостаточно эффективны. В данной статье обсуждается один из структурных методов подавления колебаний в системах для управления объектами, склонными к колебательной неустойчивости. Этот метод состоит в использовании более сложной структуры, чем традиционные ПИД-регуляторы, в частности, двухконтурный регулятор. Предлагаемый метод апробирован методом математического моделирования, в статье приводятся иллюстрирующие переходные процессы, подтверждающие эффективность этого метода.

Ключевые слова: регулятор, автоматика, обратная связь, быстродействие, точность, управление, переходный процесс, численная оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

Точное управление технологическими объектами актуально во всех отраслях промышленности, техники, технологии и науки. Эта задача всегда решается с помощью систем с обратной связью. В таких системах изменения входных управляющих сигналов, поступающих на объект, обеспечивают достижение требуемого значения выходных величин объекта с высокой статической и динамической точностью, поскольку отклонение от задания

(ошибка управления) постоянно измеряется и используется для формирования управляющего воздействия. Для успешности решения этой задачи требуется правильная структура системы и правильный расчет регулятора. Вся сложность, как правило, состоит в отыскании модели регулятора, поскольку структура системы, как правило, типовая, и состоит в том, что выходной сигнал объекта вычитается из предписанного значения (задания), полученная разница (ошибка) поступает через регулятор на вход объекта. Расчет регулятора при такой структуре основан на знании математической модели объекта, то есть его передаточной функции, описывающей преобразование входного сигнала в выходную величину.

Встречаются объекты, склонные к колебаниям выходной величины. В них даже отклик на ступенчатое воздействие имеет вид колебаний, зачастую с нарастающей амплитудой. В некоторых случаях такие колебания удается легко подавить за счет действия обратной связи, в других случаях колебания настолько присущи объекту, что весьма трудно рассчитать или подобрать при настройке регулятор, который бы подавил такие колебания в системе.

Склонность к колебаниям в полученной системе состоит в одном или нескольких из трех нежелательных свойств:

1. Большое количество колебаний, прежде чем выходная величина установится в требуемом равновесном состоянии.
2. Большое перерегулирование – превышение выходной величиной требуемого значения на существенную величину (в процентах).
3. Обратное перерегулирование – изменение выходной величины в направлении, противоположном требуемому, которое отстоит от предписанного больше, чем стартовое значение.

Для решения задачи управления такими объектами, так же, как и для управления любыми другими объектами, могут применяться регуляторы с пропорциональным, интегрирующим и дифференцирующим трактами (ПИД-регуляторы). Коэффициенты этих трактов рассчитываются разными методами, например, путем численной оптимизации. Обобщенный вид традиционной системы показан на *Рис. 1*.

Общий вид выходного сигнала ПИД-регулятора задается уравнением:

$$U(t) = K_p E(t) + K_D \frac{dE(t)}{dt} + K_I \int_{t_0}^t E(t) dt. \quad (1)$$

Здесь K_p , K_I , K_D – коэффициенты усиления пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего трактов регулятора.

Проектирование регулятора состоит в этом случае в вычислении таких значений этих коэффициентов, которые обеспечат требуемое быстродействие, точность и устойчивость системы [1–6].

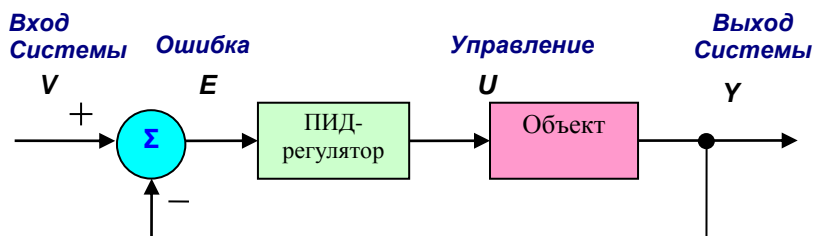


Рис. 1. Традиционная система

В настоящей статье ставится задача исследования одного из методов повышения качества переходного процесса при управлении объектами, склонными к колебаниям, который бы позволил исключить большое количество колебаний, большое перерегулирование (больше 5 %) и обратное перерегулирование.

1. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Этот метод основан на использовании полученной на первом шаге системы как нового

комплексного объекта и применении для этого объекта новой внешней системы управления, содержащей дополнительный регулятор. Структурная схема такой системы показана на Рис. 2. Объект с ПИД-регулятором во внутреннем контуре образуют систему, переходный процесс в которой неудовлетворительный. Эта система рассматривается как новый объект, внешний ПИ-регулятор со своим контуром обеспечивает управление этим сложным объектом так, чтобы качество переходного процесса соответствовало требованиям, предъявляемым к нему.

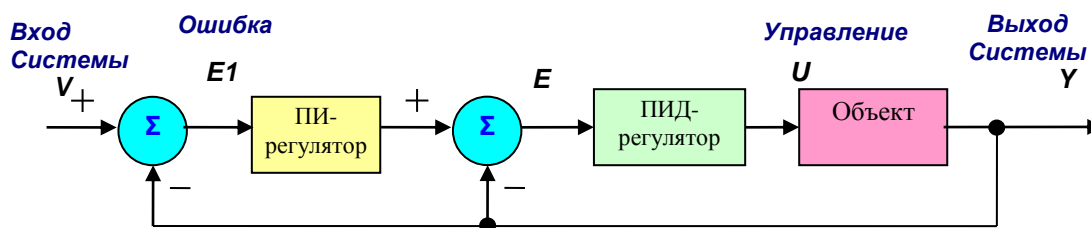


Рис. 2. Система по методу применения дополнительного внешнего контура

Рассмотрим объект из статьи [7]. В этой статье рассмотрен линейный объект, математическая модель которого задана в виде передаточной функции следующего вида:

$$W_o(s) = \frac{s^3 + 4s^2 - s + 1}{s^5 + 2s^4 + 32s^3 + 14s^2 - 4s + 50}. \quad (2)$$

На Рис. 3 показана структура для моделирования и оптимизации системы с объектом по уравнению (2), а также результаты оптимизации в виде найденных коэффициентов регулятора и полученных графиков переходных процессов. Видно, что переходный процесс неудовлетворительный. Действительно, имеется обратное перерегулирование на 25 % от предписанного скачка, причем оно возникает уже после того, как выходная величина объекта

достигла предписанного значения. Если бы эта величина так и осталась в зоне предписанного значения, переходный процесс был бы идеален. Но поскольку она идет в обратном направлении и даже уходит на дополнительные 25 % дальше от предписанного значения, чем была в начале процесса, такой процесс далек от идеала. Кроме того, после этого имеется перерегулирование на величину около 70 %. В целом в процессе имеется три ярко выраженных колебания. Для преодоления этих недостатков был использован метод переключения коэффициентов [8], но он не дал ощутимого положительного результата. Кроме того, был апробирован более сложный регулятор, который содержит не только пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий тракты, но также и тракт с двойным дифференцированием. Тем самым был

реализован ПИДД-регулятор, или как его еще называют, ПИД²-регулятор. Второе дифференцирование дало несущественное улучшение. Попытка ввести в регулятор дифференцирование третьего порядка, как и ограниченное по полосе дифференцирование, не только не дала положительного эффекта, но привела к нарушению устойчивости в системе. Каждый раз при изменении структуры регулятора использовалась процедура оптимизации, поэтому можно утверждать, что данные структуры не дают заметного улучшения качества системы ни при каких значениях параметров регулятора. Поэтому был применен метод дополнительного внешнего контура. При этом полученные в результате оптимизации коэффициенты внутреннего регулятора были зафиксированы и не подвер-

гались дальнейшему изменению в процедуре оптимизации. Внешний регулятор был задан в виде ПИ-регулятора. Структурная схема для моделирования и оптимизации показана на Рис. 4. Там же показаны полученные коэффициенты внешнего регулятора, а также коэффициенты внутреннего ПИД²-регулятора. На Рис. 5 показаны полученные переходные процессы. Наиболее быстрый процесс с небольшими колебаниями (синяя линия) – это результат оптимизации внешнего ПИ-регулятора. Для сравнения на этом же рисунке показаны графики при использовании интегрального регулятора с коэффициентами, соответственно, 0,1 и 0,05. Во всех этих случаях обратное перерегулирование отсутствует, в последних двух случаях отсутствует также и обычное перерегулирование.

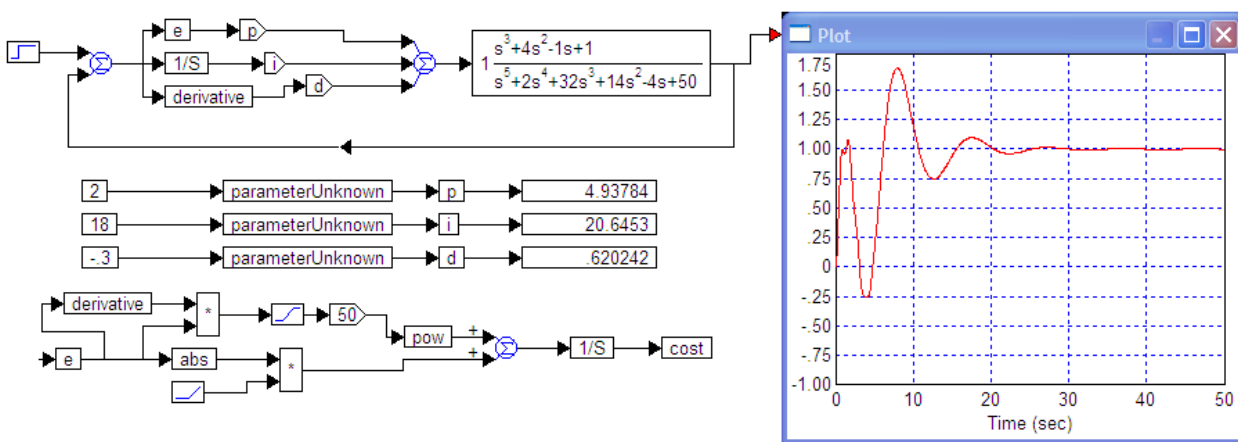


Рис. 3. Структура для оптимизации системы с объектом (2)

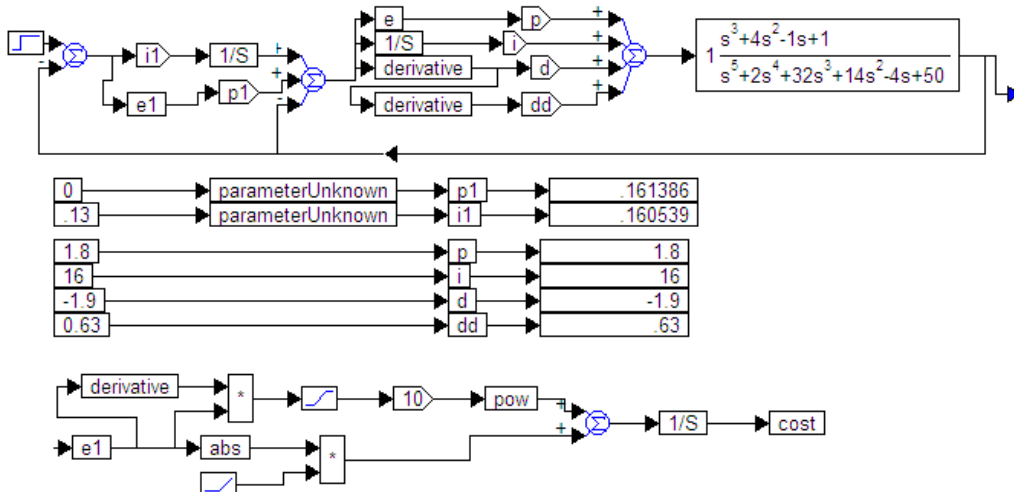


Рис. 4. Структура для оптимизации системы с объектом (2) при использовании дополнительного внешнего контура

Таким образом, предложенный метод дает эффективный инструментальный борьбы с обратным перерегулированием при скачкообразном изменении задания. Длительность переходного процесса не ухудшилась, поэтому улучшение его качества достигнуто только ценой усложнения регулятора, но не ценой потери быстродействия. Усложнение регулятора

при современном уровне техники не играет существенной роли, поскольку большинство регуляторов выполняются на базе цифровой вычислительной техники, и небольшое изменение соотношений для вычислений управляющих сигналов не усложняет системы в целом.

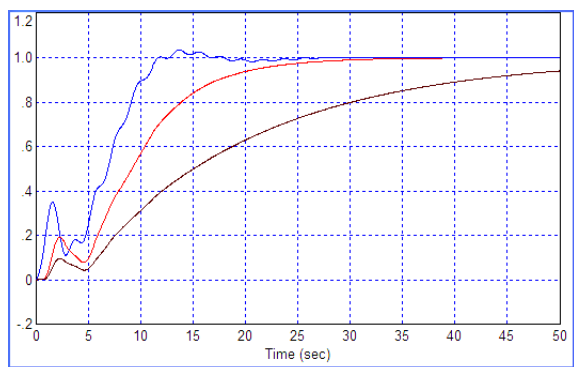


Рис. 5. Переходные процессы в системе по Рис. 4: синяя линия – с рассчитанным ПИ-регулятором, красная линия – с интегральным регулятором с коэффициентом 0,1, черная линия – интегральный регулятор с коэффициентом 0,05

2. НЕДОСТАТОК МЕТОДА

Недостаток метода состоит в том, что он эффективен лишь для улучшения качества переходного процесса при скачке задания. На Рис. 6 показан отклик системы на единичный скачок (с отрицательным знаком) помехи, включенной непосредственно на выход объекта. Для моделирования этой ситуации достаточно между выходом объекта и точкой, объединяющий отрицательные входы вычитателей на (см. Рис. 4) включить сумматор, на второй вход которого подать указанное возмущение.

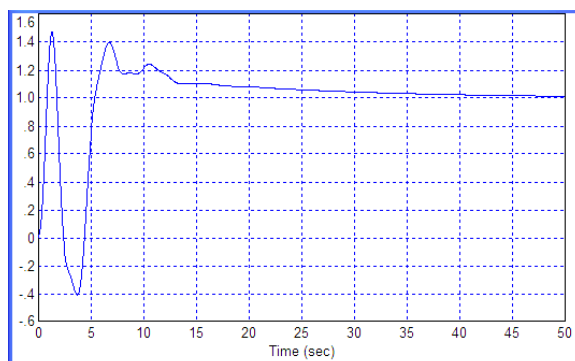


Рис. 6. Переходный процессы в системе по Рис. 4 при подаче ступенчатой помехи на выход объекта (через дополнительный сумматор)

В системах с единственным контуром управления при условии единичной обратной связи ошибка при подобном ступенчатом воздействии помехи (как функция времени) по виду полностью совпадает с ошибкой при подаче ступенчатого скачка на задание $V(t)$, поэтому авторы зачастую не осуществляют исследования вида ошибки в этом специфическом случае. Однако если в системе имеется два или более контуров, то следует учесть, что помеха приложена именно в этой точке системы, и наиболее показательной характеристикой работы системы является именно отработка помехи. Если помеху вводить через сумматор, расположенный

между выходом системы и входом первого сумматора, то отклик на такую помеху будет такой же, как отклик на Рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности», проект № 471.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). p.24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf> (Automatics & Software Engineering, URL: <http://jurnal.nips.ru/en/node/58>)
- [2] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Povyshenie kachestva perehnogo processa pri upravlenii sklonnymi k kolebanijam ob'ektami. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 3 (5). p. 12–17. URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] V.A. Zhmud. Simulation study and optimization of closed systems of automatic control. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. 335 p.
- [4] V.A. Zhmud, G.A. Frantsuzova, A.S. Vostrikov. Dynamics of mechatronic systems: Proc. Manual. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2014. - 176 p. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara, Russia. p. 557-567. V.A. Zhmud V., L.V. Dimitrov. The providing of the power saving control of one output value with two controlling channels having different effectiveness and cost of the controlling resource. International journal for science, technics and innovations for the industry. 2015. IX Issue 9. ISSN 1313-0226 / Machines, Technologies, Materials. P. 50 –54. URL: <http://mech-ing.com/journal/Archive/2015/9-2015.pdf>
- [7] Nusret Tan, Derek P. Atherton. Design of PI and PID controllers. International Journal of Systems Science. Vol.37, No. 8, June 2006. p. 543–554.
- [8] Жмудь В.А., Трубин М.В. Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 57–62.



Вадим Аркадьевич Жмудь –
заведующий кафедрой
Автоматики НГТУ, профессор,
доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Reverse Overshootings Suppression in Automation Systems

VADIM ZHMUD

Abstract. The task of control of objects prone to oscillation is extremely difficult. Analytical methods in the case of a complex object models are inferior in features methods based on numerical optimization controllers. Tools of this method is a set of structures regulators, set of objective functions and tools for modeling and optimization. A number of works of the author is devoted to the author's methods of

constructing of the objective functions, their advantages and disadvantages, as well as the rationale for the choice of program VisSim for the simulation and optimization [1-6]. The most commonly used control structure - is a serial PID-controller (PID-regulator, PID) which contains proportional, integrating and derivative links. In some cases special measures for the choice of the target (cost) functions allow to suppress oscillations in the system, however, in some cases, even these measures are not effective enough. This paper discusses one of the structural methods of suppression of oscillations in systems for control of objects prone to oscillatory instability. This method is in the use of more complicated structure than conventional PID-controllers, in particular, double-loop regulator. Mathematical modeling has tested the proposed method. Transients confirming the effectiveness of this method illustrates the paper.

Key words: controller, regulator, automation, feedback, speed, accuracy, control, transients, numerical optimization